

道西日本海における対馬暖流の流量分布の季節および経年変化

中多章文^{*1}, 田中伊織²

¹北海道立総合研究機構中央水産試験場, ²元北海道立総合研究機構中央水産試験場

Seasonal and interannual changes in the distribution of volume transport of the Tsushima warm current in the western Japan Sea off Hokkaido, Japan

AKIFUMI NAKATA^{*1} and IORI TANAKA²

¹ Central Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido, 046-8555,

² Formerly: Central Fisheries Research Institute, Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido, 046-8555, Japan

In order to clarify the seasonal and interannual variability characteristics of the flow path and water temperature distribution of the Tsushima Warm Current in the western Hokkaido Japan Sea, we calculated the average field using our oceanographic observation data from more than 30 years, and described the characteristics of the geostrophic volume transport and water temperature distribution. The long-term annual mean baroclinic volume transport of the Tsushima warm current in the western Hokkaido was approximately 1.0 Sv, which was 0.2 Sv less than that reported before 2000. The seasonal variation in transport became unclear owing to decreasing transport in June, August, and December. The distribution of warm currents was examined, and a stable northward flow off the coast of Iwanai Bay was found, along with a bifurcation flow along the coast of Iwanai Bay. Compared with the long-term mean, the mean temperature in the last decade after decreasing the volume transport showed a wide negative temperature deviation in the middle layer of the Tsushima warm current area, suggesting a decrease in heat transport associated with a decrease in volume transport.

キーワード：傾圧地衝流量, 暖流流路, 対馬暖流

温暖化や気候変動が注目される以前の1980年代には、当時の道立水産試験場では、資源変動や漁場形成機構の解明の観点から、海洋環境研究の重要性が組織的に検討され、1989年前後から組織的な海洋観測網を整備し（小笠原・田中, 1989）定期海洋観測が継続して行われてきた。この定期海洋観測により、本道西岸日本海の対馬暖流北上流量の季節および経年変化についての研究報告や（中多・田中, 2002）、檜垣ら（2008）によって水系分布や比較的広範囲の流れパターンの季節変化などが記述されてきた。前者においては、茂津多岬西方のJ4線（42.5°N）に注目し暖流の幅や深さを評価した上で、流量の季節変化や経年変化を記述しているが、J4線より南の津軽海峡西方や北の石狩湾沖については調べられていない。後

者では広く道西日本海を解析対象としているが、水系分類を用いた模式的な海洋構造として解析されており、水産生物との関連指標である水温との対応がわかりにくくなっている。さらに両論文ともに2001年以前のデータを解析対象としており、「これまでに経験したことがない」と気象庁発表でよく耳にするように、人々の体感レベルで温暖化や気候変動が認識できるようになった近年においては、過去の研究も最新のデータを用いてアップデートしてゆく必要がある。特に、Kida *et al.*(2021)が指摘する日本海の通過流量の増加傾向の有無は、道西日本海の対馬暖流にも影響を与えらる。そこで、ここでは30年を超える定期海洋観測データを用いて道西日本海における対馬暖流の流路（主流部）の気候値（30年）に近

報文番号A629（2023年10月27日受理）

*Tel: 0135-23-7451. Fax: 0135-23-3141. E-mail: nakata-akifumi@hro.or.jp

い季節変化を水温分布と合わせて記述するとともに、年代別に対馬暖流の流路と海洋構造の変化について調べた。

試料および方法

道総研水産試験場による全道周辺海域の海洋観測は偶数月を基本に2ヶ月に1回の頻度で行っており、ここでは1988年10月以降2021年2月までのおよそ32年間のデータ(4~8月:32年間, 10~2月:33年間)を解析対象期間と

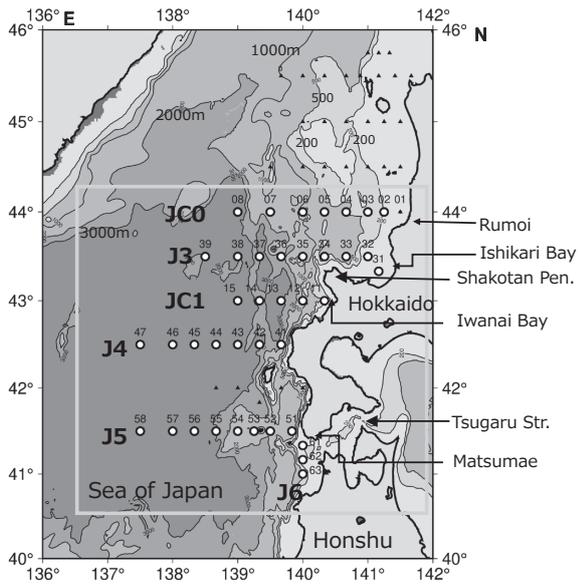


Fig. 1 Location of the periodical observation and sea bottom topography.

した。「流れとしての対馬暖流を調べる」コンセプトで観測線が設定され、観測線と観測点にはアルファベットと数字でコード名を付けてデータを管理している。本稿では留萌西方沖のJC0線から松前西方沖のJ5線までを主な解析対象海域とした (Fig.1)。各偶数月の観測実施率を Fig.2に示す。荒天の多い冬期間の2, 12月の実施率は他の月より下がるが, J3, J4線では概ね6割以上の実施率となっている。なお, J3, J4, J5線の最も西側の観測点は実施率が低くなっており, これは燃油高騰や調査船の減船のため2009年より観測を中断していることによる。また, JC0線 (留萌西方沖), JC1線 (岩内湾西方沖) の観測線は時期や年代により観測実施率に濃淡があり, JC0では6, 8月に6割程度, JC1では2, 12月が5割, その他の月は8割程度の実施率となっている。なお, 檜山西方奥尻島南の42° Nにも観測線があるが, 調査頻度や観測範囲が限られているため今回の解析では取り扱っていない。海底地形を見ると, 積丹半島以南では陸棚が狭く, 日本海盆に続く水深の大きな海域が広がっているのに対して, 積丹半島以北では武蔵堆も含む陸棚が発達しており, 傾圧地衝流の無流面を十分深く設定することができない。そのため対馬暖流を傾圧流として津軽海峡から宗谷海峡まで南北連続して解析することが困難である。

そこで, 傾圧地衝流の算出に十分な水深のある, Fig.1に示した道西日本海留萌沖定線 (JC0線) から津軽海峡南方 (J6線) までの観測データを解析対象とし, 一部は公開されている海洋調査要報 (1999) から, それ以外の未印刷資料を観測データベース (マリンネット北海道)

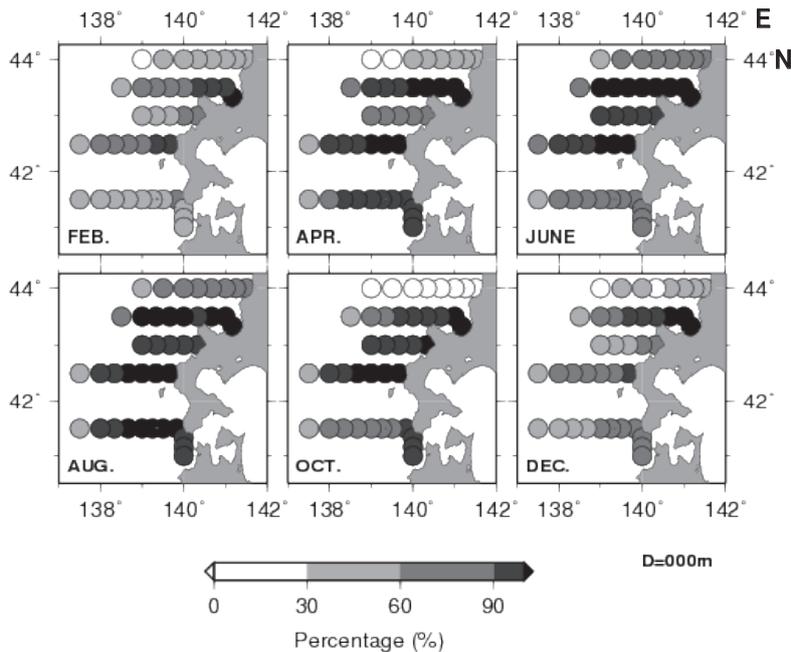


Fig. 2 Diagram of observation rate at each station in 30 years.

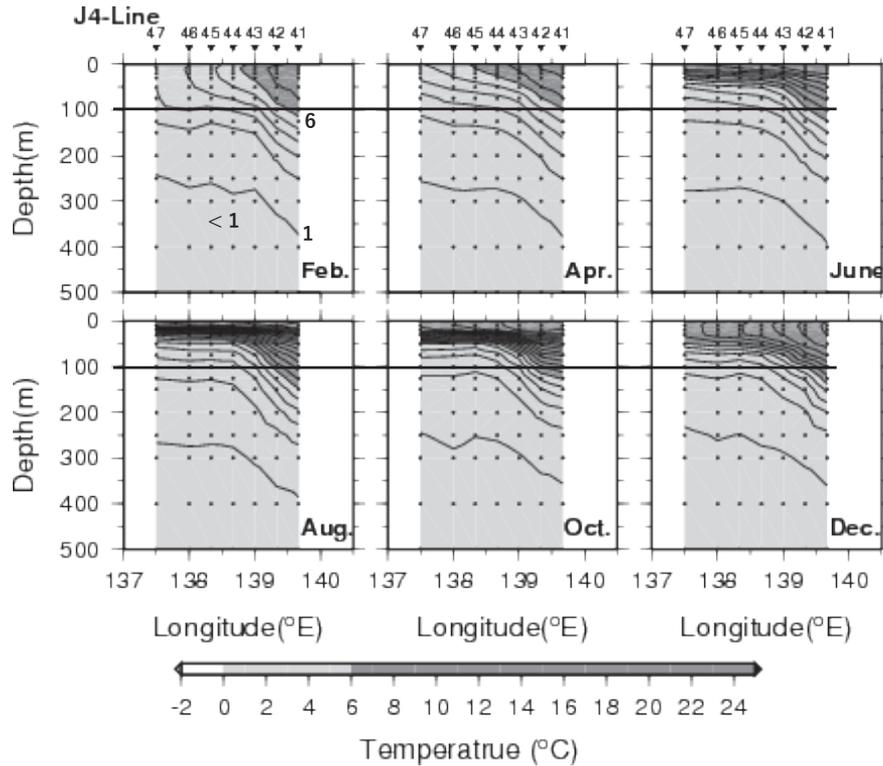


Fig. 3 Vertical distributions of long-term mean temperature on the J4 line.

から抽出した。32年間の1/3以上として11年分以上の観測数がある地点を解析対象とし、解析対象海域での、おやしお丸(当時北海道立中央水産試験場所属で2012年3月用途終了廃船)と北洋丸(稚内水産試験場所属)、金星丸(函館水産試験場所属)で実施された海洋観測データから基準層(表面, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500 m)の水温塩分値を用い、各測点間の400 m (db) 基準の地衡流量を算出し統計処理を行った。石狩湾周辺や留萌西方沖には400 mに満たない陸棚域が広がっているが、この場合は浅い方(岸側)の水深を基準として流量を求めた。また併せて、解析対象海域の水温の累年平均を求めこれを長期平均とした。さらに、およそ10年間を年代の単位としてその年代の観測月別の統計値を求め比較解析に供した。年代としては観測開始時の1988年10月から1999年12月(以降1990年代と呼ぶ)、2000年2月から2010年12月(2000年代)、2011年2月から2021年2月(2010年代)の3年代とした。なお、流量算出には観測点間の距離が必要となるが、最も西側の観測点間(J38-39, J46-47, J57-58)距離は経度差30分で、他の測点間隔(経度差20分)より広がっているが、流量として扱っているため補正は行わずそのまま用いている。

対馬暖流の指標となる水温を調べるため、1988年以降の累年平均からJ4線の水温断面をFig. 3に示す。対馬暖流主流部は、水温断面上では等温線の水平勾配が大きいと

ころとして見る事が出来る。この勾配の大きい箇所において全観測月で100 m深を横切る等温線はおよそ6 °Cであり、ここでは100 m深で水温6 °C以上のエリアを対馬暖流の指標水温として定義した。

結果

各観測線における流量分布とその季節変化 各観測線における流量分布とその季節変化をFig. 4に示す。J5線(41.5 ° N)では北上流が周年で見られるのはJ53より西側のJ53-56間にあり、2~10月ではJ5全北上流量の5割以上を占めJ53-56間が主流部になっている。沿岸側のJ51-52間では2, 4月では標準偏差は大きいものの平均値としての北上流量は少なく、4月には平均値でわずかに南下流となっている。6月から北上流が増えはじめ、12月に0.8 Svを超え5割程度となり沿岸側が主流部となる。J4線(42.5° N)では10月を除いて岸に近いほど北上流量が多くなっており、特にJ41-43間は東西に変化することはない周年で安定した主流部となっている。10月にJ41-42間で流量が減少するが、平均としては南下流とはなっておらず、12月には再び増加する。JC1(43° N)線では、沖側のJC14-15間の北上流量が周年で0.2 Sv前後と安定して見られる。2~4月には岸側のJC11-13に主流部があるが、6~8月にかけて主流部が西へ移動しているように見える。10月に

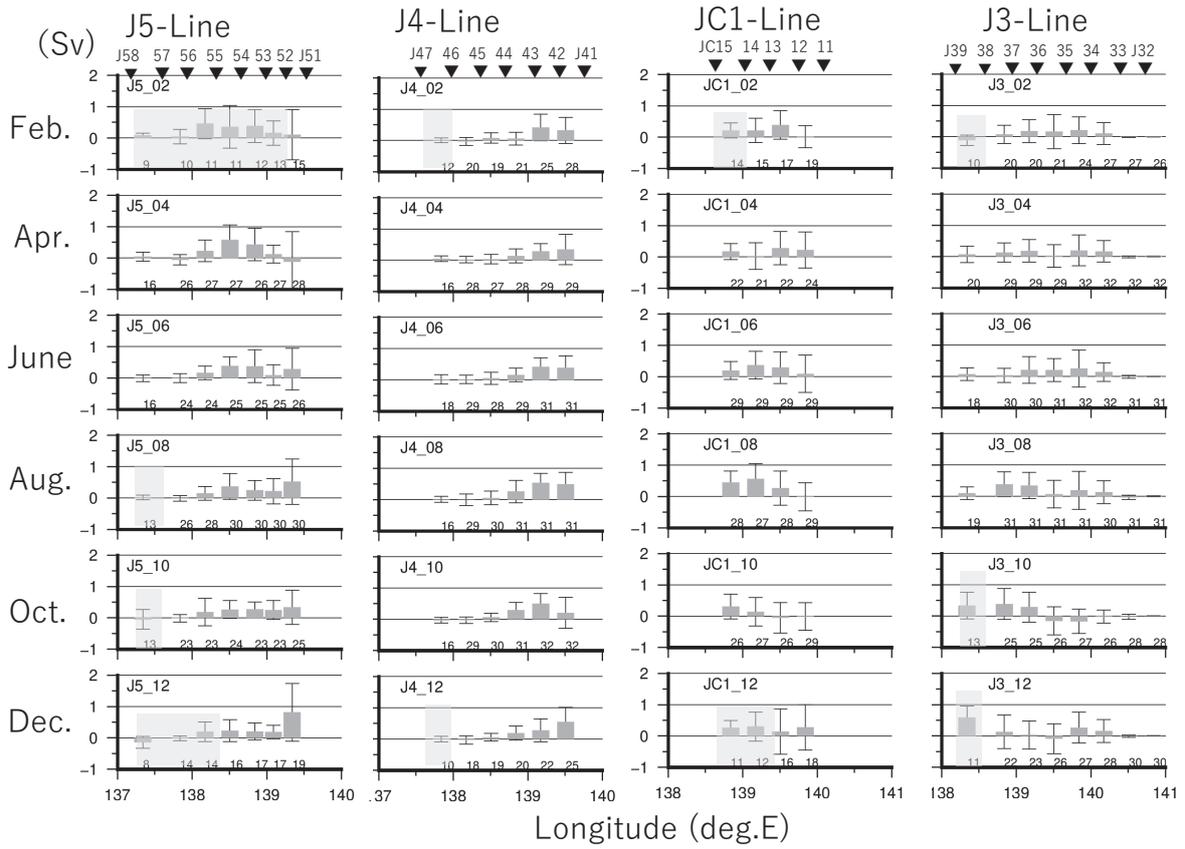


Fig.4 Mean and standard deviation of northward baroclinic volume transports between each station in the observation month at each observation line. The number on the X axis represents the number of samples. Hatching areas indicate that the number of samples is 15 or less.

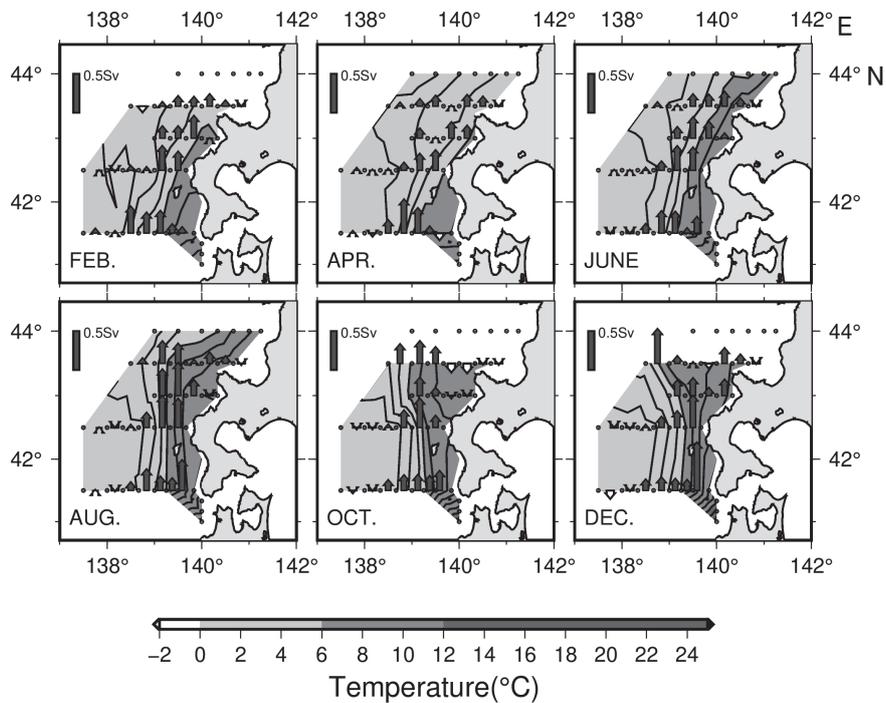


Fig.5 Horizontal distributions of long-term (1988–2021) mean sea temperature at a depth of 100 m and mean volume transport at the two stations.

はJC12-13間で南下流となり、12月には再び北上流に転じる。J3線 (43.5° N) では周年で北上流となるのはJ36-37とJ37-38だけで、年間の合計北上流量でも最大となっている。J34-35の北上流は2~6月では他より多く、10月に南下流となるものの、12月に再び北上流となる。年間の北上流量ではJ36-38間より少なくなっている。

累年平均の100 m 深水温分布と各観測線の流量分布

観測月ごとに累年平均の100 m 深水温分布と流量分布を合わせてFig. 5に示す。また、対馬暖流の水塊指標として100 m 深水温6℃以上のエリアにハッチをつけている。流量は東西方向の観測線に直行する傾圧地衡流量なので矢印は南北方向だけとなり北向きを濃い灰色、南向きを白色の矢印で表示した。流量がゼロに近いところは矢印の頭だけが南北方向に表示されている。

ここではまず解析対象海域の100 m深の累年平均の水温分布について、その特徴を整理する。年間の最低水温に注目すると、調査海域では周年を通じておよそJ4線 (42.5° N) 以南、沖側ではJ45 (138° 40' E) 以西に3℃以下の海域がある。これより東の岸側は暖流域でありJC11以南ではおよそ6℃以上の、松前西方のJ51 (41.5° N) では7℃以上の対馬暖流に周年覆われている。

各月ごとに見ると、2月では6℃の等温線は岩内湾沖のJC1線まで達している。4月になると6℃以上の海域は縮小し、年間を通し最も狭くなるが、以前として岩内湾JC11では6℃以上を保っている。6月になると6℃の等温線は北上し、7℃の等温線とともに留萌西方JC0線 (44° N) に達する。沿岸側に暖水が入ってくることで沖合と沿岸との東西方向の水温差が大きくなっていく。8月には沿岸側では8℃以上となり、岩内湾JC11では9℃以上の暖水域が出現し、茂津多岬西方のJ41や松前西方J51より水温が高くなっている。10月にはJ3線積丹半島西方沖からJC1線の岩内湾にかけて8℃以上の暖水域が広がり、一つの暖水域にまとまっているように見えている。また、6℃の等温線は西へ膨らみ蛇行している。12月では6℃の等温線の蛇行はJ3線ではやや西へ広がるが、JC1線では東へ狭まる。J3線のJ36-38付近の7℃と8℃の等温線が東西に広がる暖水域（渦）があり、沿岸では南から9℃の等温線が北に伸び、一旦J4線で途絶えているが、岩内湾JC11では9℃以上となっている。また、J33では10℃以上、J51でも10℃台と、松前西方J51と石狩湾沖とが同程度の水温となっており、J33、34では12月が年間で最も水温が高くなっている。

次に流量の分布と100 m深水温との対応についてみると、まず、全体として3℃以下の海域ではほぼ流量がないことと、周年では6℃の等温線に沿って流量の多い場所が分布していることが分かる。

2~6月では6℃の等温線の西側（沖側の6℃以下の低温

側）で流量が多くなっている。8月から6℃の等温線上から東側（岸側）で流量増加が顕著になってくる。J4線からJC1線の西のJC13-15を経てJ38-36へと流量の多いところが6℃の等温線に沿って南北に連なり、等温線はJ3線を超えると急速に東へ向きを変えている。10月のJ3線、JC1線では6℃の等温線が8月より西に広がり、主流部はその6℃の等温線付近のJ36-39やJC15付近にある。12月になるとJ3線では6℃の等温線上J38-39に流量の多いところがあり、岸側にはJ5、J4線やJC1線の北上流量増加と同時に、J34-36間を北上する流量が再び現われている。

J4線 (42.5° N) の傾圧流量の経年変化

現在のJ4線に対馬暖流傾圧流量の主流部がほぼ捉えられていることを確認したことから、このJ4線の流量から対馬暖流の長期的な変動傾向を示した (Fig. 6)。2ヶ月ごとの流量変化は大きく、季節変動と同等の短期変動が含まれていると思われる。季節変化はこの図からは見えてこない。2000年までは2.0 Svを超える流量は、1990年12月、1993年、1995年、2000年の8月の4回あり、2001年以降では数回観測されたが、2001年以降では2.0 Svを超える流量は2013年8月の1回のみとなっていた。一方、負の流量（南下流）は2000年まで2000年12月の1回だけで、2001年以降ではJ41-42間の流量であるが2006年、2008年、2009年の2月に観測されており、後半では最大と最小値の振れ幅が大きくなっていくように見える。移動平均をみると、1990年代から2000年代にかけて6、7年周期で減少傾向であったが、2000年代以降は減少傾向から横ばいとなるとともに6、7年周期も見えなくなっているようだ。

ラベージ検定を行うと1988年から1996年までとそれ以降に不連続なジャンプが認められた（危険率5%：前後3年=36ヶ月分の検定による）。10年（60ヶ月分）なら危険率10%だが、2001年頃が減少傾向から横ばいへの変化傾向が変わる境になると見られた。

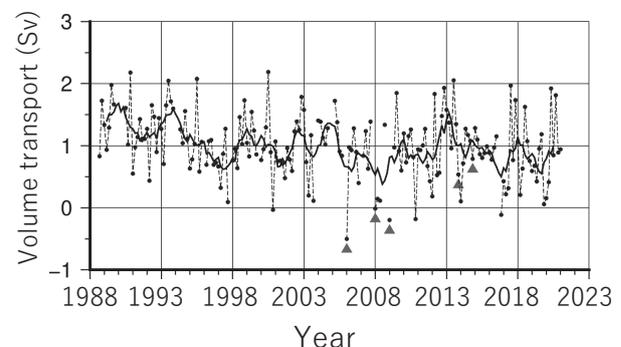


Fig. 6 Interannual variability in the northward transport at the J4 line. The thick line indicates the running mean of 14 months. The dot at the top of the gray triangle indicates the volume transport between J41-J42.

次に観測偶数月ごとに集計して季節変化をみると (Fig. 7 a), 流量は2月が最も低く0.8 Svで半年後の8月が1.4 Svと最も多くなっていった。各月の標準偏差は大きい, 8月に最大流量を示していた。ラベージ検定で示されたように経年変化に変調が見られる観測開始から2000年までと, その後の20年を2つに分けて, 30年を3期間に分けて季節変化を比較すると (Fig. 7 b), 1990年代は中多ら (2002) で記述されているように, 4月が最小, 8月が最大で, 10月に一度減少し, 12月に再度増加する特徴ある変

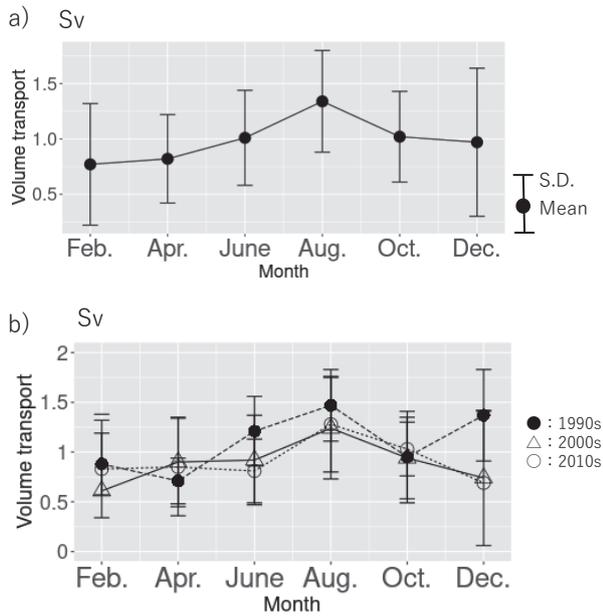


Fig. 7 Seasonal variation of northward transport at J4-Line (a) and decadal mean seasonal variation of transport (b).

化となっていたが, 2000年代, 2010年代では季節変化の幅が小さくなり, 4月の流量はわずかに増加したが, 6, 8, 12月の流量は大きく減少していた。

このように, 年代別に季節変化を比較することで長期変動が見やすくなることから, 以降の解析でも3年代に分け, 流量の多かった1990年代と流量減少後の2010年代の2つの年代を比較して解析を進める。

1990年代と2010年代の流量と水温場の比較 Fig. 8に両年代の平均場を示した。年代で分けた場合, 年代によって欠測の多い海域や観測中断となっている海域が変わるので, 平均場で比較可能な海域が狭くなっている。例えば2012年以降, 2月の観測海域はJ4線以北となりJ5, J6線の観測は実施されていない。西端の観測点 (J58, J47, J39) も観測が中断しているため, 解析対象海域は狭くなっている。またJC1線も1990年代は観測が少ないなど年代別に比較できる海域に若干差がある。目安として各年代の10から11年間で半数以上の観測数がある地点の平均を示している。

まず, 水温分布の違いについて1990年代と比較すると, 2010年代では8~12月にJ4, J5線の西側沖に2℃の等温線が見られない。1990年代では8~12月にJ4線からJ5線の138° 20'E付近を中心に100 m深で2℃以下の冷水域が見えていたが2010年代では3℃の等温線までしか見当たらない。2月は1990年代では6℃以上の等温線が積丹半島に達していたが, 2010年代には岩内湾までにとどまっている。2010年代ではJ3線で8月から西方へ暖水が広がり始め, その暖水の北側JC0線の140° E付近で南下流となり5℃以下の海域となっている。10月にはJ3線の6℃以上の海域が1990年代より西側に分布し, 暖水の中心部となる

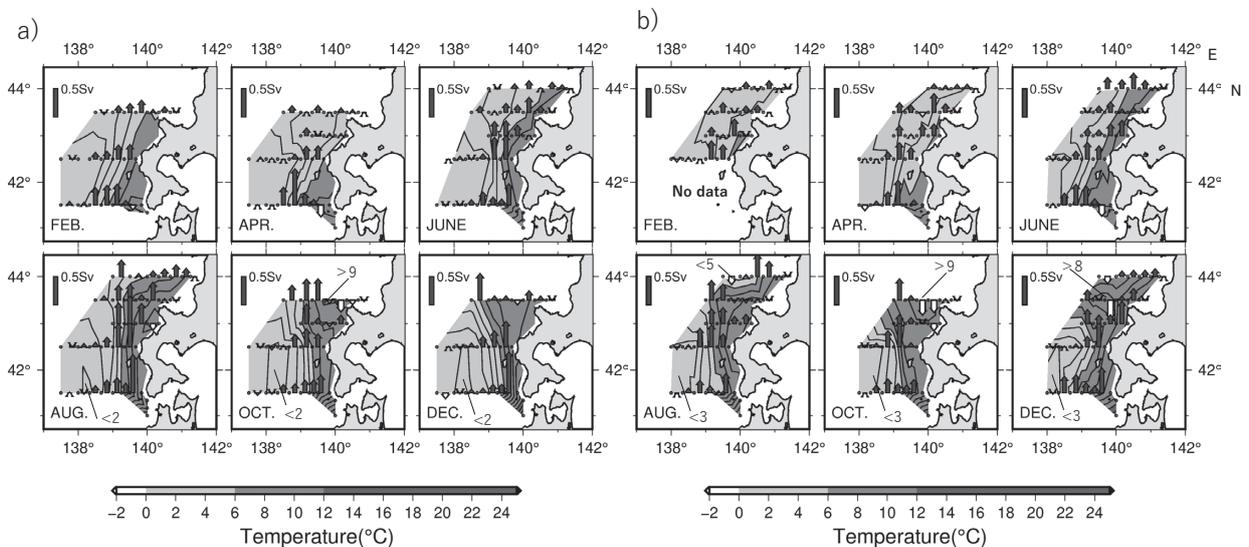


Fig. 8 Comparison of distribution in temperature at a depth of 100 m and volume transport in the 1990 s(a) with those in the 2010s(b).

9℃以上の海域も積丹半島西方に大きく広がっている。12月ではJ3線とJ5線の暖水の西への広がりが顕著となり、他方、J4線では沿岸側に狭くなっており、1990年代より2010年代で等温線の蛇行が大きくなっている。

流量分布について比較すると、12月を除く2~10月でJ41-J42間の流量が減少しており、J42-J43間で流量が増加し対馬暖流の主流部が沖に変化しているように見える。J5線では1990年代の2、4月に松前西方で南下流となっており、その西側140° Eを中心に北上流量が多く、南下流と北上流

が東西に分布する渦構造となっている。2010年代では2月のJ5線の観測はないもののこの渦構造は6月まで継続している。J3線でも10月に南北流が東西に分布する構造が見られ、2010年代の方で南下流が大きく、JC11-12間も南下流となるなど岩内沖JC1線まで影響しているように見える。

考察

水温と流量分布の長期平均から、今回の解析対象海域において周年の対馬暖流の流路を辿ることができる (Fig. 5)。それらは概ね等温線との対応が見いだせたが、ある深度の一意の水温を指標値とする場合は、季節によって主流部の位置が等温線の東西にずれるので注意を要する。**流量と水温の年代比較** 1990年代の8月から12月にかけてJ4線とJ5線の138° Eから138° 20' E付近で見えていた100 m 深で2℃以下の海域 (2℃の等温線) は2010年代には見えなくなった。この冷水域は2010年代では150 m 以深にあり2℃の等温線が深くなっている。佐藤 (2022) でも指摘しているように当海域の温暖化の進行がうかがえる。また、この海域は道西日本海対馬暖流の沖側の密度構造を形成することから、これらの等温線の深化 (温暖化) は沖側の力学高度を上げて北上流量減少の要因にもなっていると考えられる。

また、2月に1990年代で100 m 深6℃の等温線は積丹半島まで伸びていたが、2010年代には南の岩内湾にとどま

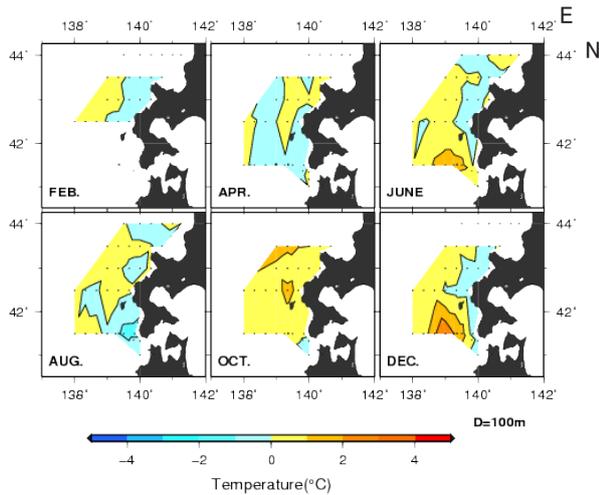


Fig. 9 Distribution of temperature deviation by decadal mean at a depth of 100 m in the 2010s.

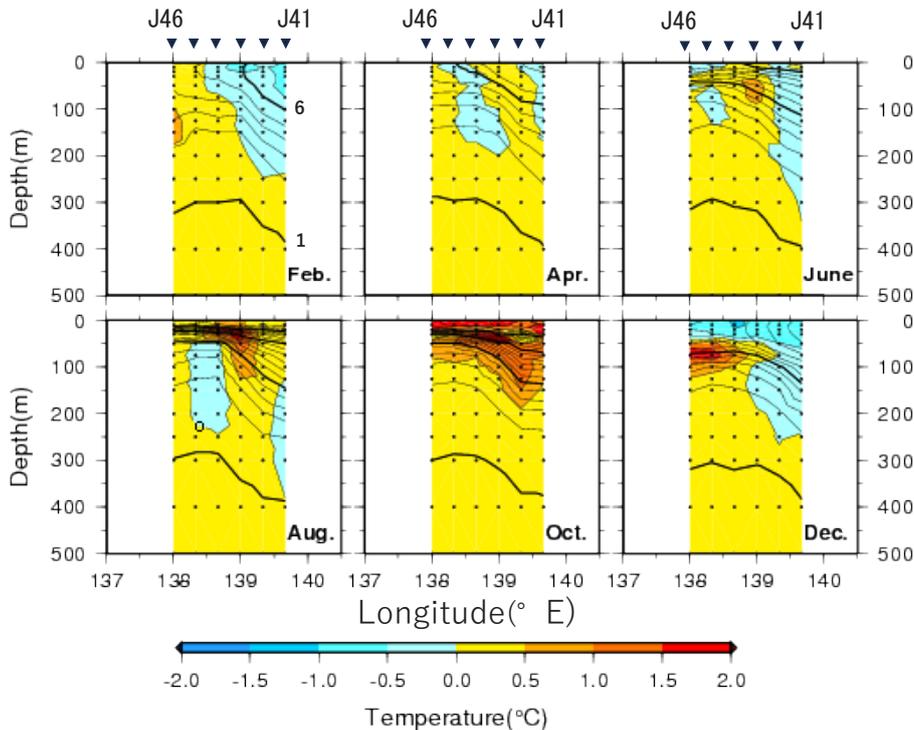


Fig. 10 The decadal mean temperature section (solid line) and its deviation (color bar) from long-term mean field in the 2010s.

っており、積丹半島以北にとって逆に寒冷化となることから、北上暖流の流量減少がうかがえる。

2, 6, 8, 12月のJ4線流量は、2010年代では1990年代より減少しており (Fig.6), 2010年代の沿岸域における水温低下は流量減少と矛盾しない。留萌以北の北部日本海では100 m と200 m深の水温の低下傾向について報告(宮園ら, 2008; 美坂ら, 2019;)がある。そこで、流量の変化(ここでは減少)が水温場にどのように現れているかを見るため、2010年代の100 m 深水温について、長期平均(30年平均)に対する水温偏差を求めた (Fig.9)。沿岸域は10月を除き南北に負偏差海域となっており、これに対して対馬暖流域の西側が広く正偏差であった。この沖合の正偏差については、例えば6月、12月のJ5線、10月のJ3線の沖合域で見られる暖水渦の発達や移動に伴うものと、沖合冷水の温暖化で説明できる。一方で沿岸域の負偏差については負偏差海域が暖流域にそって南北に広がっていることから暖流の流量減少が示唆される。次にJ4線の2010年代の平均水温断面図(実線)とその30年平均からの偏差をFig.10に示した。流量が1990年代を特に下回った6, 8, 12月を見ると、春から秋の昇温期に成層するあるいは冷却混合期に鉛直混合が盛んになる50 m 深より浅い深度で正偏差となっている一方で、沿岸側50 m以深の等水温線が傾斜している暖流の傾圧構造部分で30年平均より水温が低いことが分かる。先に指摘した沖合冷水の温暖化も考慮すると、傾圧流量の減少とともに熱輸送量も減少し、道西日本海の暖流域とされる海域ではここ10年の平均でみると30年平均を下回る水温環境となっていたと言える。

謝 辞

この海洋観測に従事されたおやしお丸, 北洋丸, 金星丸の歴代船長をはじめ、乗組員各位に深く感謝申し上げます。

また、定期観測の継続実施にお力添えを頂いた関係各位に深謝いたしますとともに、有益なコメントを頂いた査読者の皆様にお礼申し上げます。

引用文献

- 檜垣直幸, 磯田 豊, 磯貝安洋, 矢幅 寛. 北海道西岸沖における水系分布と流れパターンの季節変化. 海の研究 2008; 17(4): 223-240.
- 海洋調査要報 第1~15号 北海道立水産試験場, (1985-1999)
- Kida S, Takayama K, Sasaki Y.N, Matsuura H, Hirose N, Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *J. Oceanogr.* 2021; 77: 145-153.
- 美坂 正, 星野 昇, 渡野邊雅道, 本間隆之, 志田 修, 三原行雄, 板谷和彦, 三宅博哉. 北海道日本海海域におけるスケトウダラ産卵群の分布変化. 北海道水産試験場研究報告 2019; 95: 55-68.
- 宮園 章, 西田芳則, 田中伊織. 定期海洋観測19年間(1989-2007)の水温・塩分トレンドからみた北海道周辺の海況特性. 2008年度日本海洋学会春季大会講演要旨集 316 2008. 3
- 中多章文, 田中伊織. 北海道西岸における対馬暖流傾圧流量の季節および経年変化. 北海道立水産試験場研究報告 2002; 63: 1-8.
- 小笠原惇六, 田中伊織. 日本海沿岸(津軽海峡以北)における対馬暖流の変動 対馬暖流および津軽暖流の変動機構と東北・北海道沿岸における津軽暖流の挙動. 文部省総合研究(B)研究報告集63306014 1989; 37-44
- 佐藤政俊. 日本海の北海道西岸域における海洋環境の特徴と変化. 北水試だより 2022; 104:10-13.